

氏 名 ( 本 籍 地 )	手賀 直樹 ( 茨城県 )			
学 位 の 種 類	博 士 ( 工 学 )			
学 位 記 番 号	博 甲 第 6820 号			
学 位 授 与 年 月 日	平成26年 3月25日			
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第4条第1項該当			
審 査 研 究 科	数理物質科学研究科			
学 位 論 文 題 目	Study on Impact of Random Telegraph Noise on Scaled MOSFETs (ランダム・テレグラフ・ノイズの微細 MOSFET への影響に関する研究)			
主 査	筑波大学教授	工学博士	山田 啓作	
副 査	筑波大学教授	工学博士	山部 紀久夫	
副 査	筑波大学教授	Ph.D.	佐野 伸行	
副 査	筑波大学教授	博士(工学)	大野 裕三	
副 査	筑波大学准教授	博士(工学)	大毛利 健治	
副 査	早稲田大学教授	博士(工学)	渡邊 孝信	

## 論 文 の 要 旨

MOSFET におけるランダム・テレグラフ・ノイズ(RTN)とは、ゲート絶縁膜及び半導体界面に存在する 1 個のトラップがキャリアの捕獲と放出を繰り返すことによって、しきい値電圧( $V_{th}$ )が 2 値にランダムに揺らぐ現象である。マージンが少ないアナログデバイスでは、フリッカーノイズを構成するノイズとして古くからよく知られている現象であり、また単電子の捕獲・放出を観測することができるために、学術的にも様々な議論がされてきた。一方、デジタルデバイスでは、ノイズによるしきい値電圧変動量( $\Delta V_{th}$ )は、半導体中の不純物数揺らぎによる  $V_{th}$  ばらつきや負バイアス温度不安定性(NBTI)などに比べると設計マージンの誤差の範囲であり問題とはならなかった。ところが大容量フラッシュメモリなどデジタルデバイスの微細化が進み、RTN が無視できない状況になってきた。なぜなら、RTN による  $\Delta V_{th}$  はゲート面積に反比例する特徴があり、RTN による  $\Delta V_{th}$  は微細化と共に増加するからである。今後、大容量フラッシュメモリだけではなく微細 CMOS でも RTN が問題となると予想されることから、本研究は RTN の MOSFET の微細化への影響を明らかにすることを目的とした。また、微細 pMOSFET で問題となる NBTI と RTN の関係を明らかにすること、RTN を引き起こすトラップについての情報を持つ時定数に着目し RTN の物理モデルを構築することを行った。

本研究ではまず、正規分布上で裾を引く RTN によるしきい値電圧変動量( $\Delta V_{th}$ )に最適な統計分布を明らかにすることを試みた。最適な統計分布を見出すことは、高累積点の値を見積もること

ができるので、回路マージン設計へ用いることや、RTN のプロセス依存性を比較することが可能となる。解析の結果、極値分布、特にガンベル分布が RTN によるしきい値電圧変動量を示すのに最適であることを明らかとした。また、大きな $\Delta V_{th}$ を示す RTN には、RTN が複数重畳した複合 RTN が存在することを明らかとした。

このガンベル分布を用いて、第 1 に RTN の 22nm 世代までの微細化への影響、第 2 に RTN の微細 MOSFET で適用が考えられている高誘電体ゲート絶縁膜/金属ゲート構造(HK/MG)への影響、第 3 に 3 次元デバイスを想定した RTN のチャネル面方位依存性、そして第 4 に nMOSFET と pMOSFET における RTN の違いに関して調べた。その結果、RTN による $\Delta V_{th}$ がゲート面積の逆数にべき乗則で増加することを明らかとした。次に、HK/MG MOSFET において 475°C の高温で水素アニールを行うことで、トラップをパッシベーションする水素が十分に HK 膜中を拡散し、その結果、RTN による $\Delta V_{th}$ を抑制できることを明らかとした。さらに、HK/MG MOSFET は、薄い等価酸化膜厚のために、通常の SiON/多結晶ポリ Si ゲート MOSFET と比較して、RTN による $\Delta V_{th}$ を抑制できることを明らかにした。RTN のチャネル面方位依存性では、Si(100)、Si(111)、Si(110)基板上に MOSFET を作製し評価した結果、サブオキサイド量が多い Si(110)は速い時定数の大きな振幅を持つ RTN を生じさせることを明らかとした。これは、伝導帯近傍の界面準位に起因していると考えられる。さらに、pMOSFET における RTN による $\Delta V_{th}$ と nMOSFET における $\Delta V_{th}$ を比較し、pMOSFET の $\Delta V_{th}$ の方が nMOSFET と比較して大きいことを明らかとした。要因として、捕獲された電荷のクーロンポテンシャルによって起こる電流変化が pMOSFET の方が大きいことがあ

ることを明らかとした。

さらに、NBTI ストレス前後の RTN のよる  $V_{th}$ の変化と界面準位の変化を調べたところ、界面準位は劣化するが回復が遅く、一方でストレスによって一時的に活性化された RTN や、一度だけ正孔の捕獲・放出を示す RTN は、ストレス後に直ぐに消滅することを明らかとした。したがって、NBTI 現象の急速に回復成分は主にストレスによって活性化された RTN であり、回復が遅い成分は界面準位であると言える。

続いて、RTN の時定数から導かれる活性化エネルギーや、RTN の時定数のゲート電圧依存性を統計的に解析することで、RTN の物理モデルの構築を試みた。その結果、RTN の活性化エネルギーやゲート電圧依存性の幅広い分布は RTN トラップを絶縁膜中に浮かぶ導体球として取り扱い、電磁気学的な効果から説明できることを明らかとした。また、RTN の電荷の捕獲エネルギーと放出エネルギーは、非放射マルチフォノンモデルに従い、強い相関関係があることを明とした。

以上の RTN の高温水素アニール依存性、基板面方位依存性、さらには RTN の活性化エネルギー、時定数のゲート電圧依存性の結果から RTN を引き起こすトラップはゲート絶縁膜と基板の界面近傍に位置すると結論した。

## 審 査 の 要 旨

〔批評〕

手賀氏は、近年特に問題が顕在化している電子デバイスの RTN 現象に対して、MOSFET を題材

にして、先駆けて統計的解析手法を試み、実用化に耐え得る品質を達成するための研究で目覚ましい成果をあげた。本論文は9章より構成され、2章でRTN特性の統計的解析手法、3章から6章はトランジスタのスケーリングおよびプロセス依存性によるRTN特性について考察している。2章から6章は日立製作所中央研究所における成果であり、JJAP(1件)、IEDM(2件)、VLSI Symposium(1件)、IRPS(2件)の筆頭での論文および競争的な国際学会発表により、早期修了プログラム対象者の認定に至っている。

7章のNBTI(負バイアス温度不安定性)ストレス起因のRTN解析は、本大学院において行われた研究であり、ストレス印加後の回復現象において特徴的なRTNを捉える事に成功し、それを考慮したモデルを確立した。これは、JJAPにおいて掲載される予定である(受理済み)。さらに、8章において、RTNの物理モデルを古典電磁気学により考察し、RTNの活性化エネルギーとバイアス依存性について考察している。モデルをさらに現実系に近づける事により、コンパクトモデル等への展開が期待される。

平成26年2月20日に行なわれた博士論文公開発表会では、短期間にもかかわらず上記の十分な理解と実践が達成されていることを確認することができた。

#### 〔最終試験結果〕

平成26年2月20日、博士論文公開発表会(数理物質科学研究科学学位論文審査委員会)において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

#### 〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。